

西安电子科技大学博士研究生学位论文

LaTeX 模板

作者姓名 朱磊

学校导师姓名、职称 邵晓鹏 教授

国外导师姓名、职称 Sylvain Gigan 教授

申请学位类别 工学博士

学校代码 10701
分 类 号 0439

学 号 1605110267
密 级 公开

西安电子科技大学

博士学位论文

西安电子科技大学博士研究生学位论文 LaTeX 模板

作者姓名：朱磊

领 域：光学工程

学位类别：工学博士

学校导师姓名、职称：邵晓鹏 教授

国外导师姓名、职称：Sylvain Gigan 教授

学 院：物理与光电工程学院

提交日期：2017 年 4 月

Thesis/Dissertation LaTeX Template for Postgraduates of XIDIAN UNIVERSITY

A Thesis submitted to
XIDIAN UNIVERSITY
in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Doctor
in Optical Engineering

By

Zhu Lei

Supervisor: Shao Xiaopeng
Supervisor: Sylvain Gigan

Title:Professor
Title:Professor

April 2017

西安电子科技大学 学位论文独创性（或创新性）声明

秉承学校严谨的学风和优良的科学道德，本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得西安电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同事对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。学位论文若有不实之处，本人承担一切法律责任。

本人签名：_____

日 期：_____

西安电子科技大学 关于论文使用授权的说明

本人完全了解西安电子科技大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权属于西安电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅、借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。同时本人保证，结合学位论文研究成果完成的论文、发明专利等成果，署名为西安电子科技大学。
保密的学位论文在_____年解密后适用本授权书。

本人签名：_____

导师签名：_____

日 期：_____

日 期：_____

摘要

透过散射介质成像摘要是学位论文的内容不加注释和评论的简短陈述，简明扼要陈述学位论文的研究目的、内容、方法、成果和结论，重点突出学位论文的创造性成果和观点。摘要包括中文摘要和英文摘要，硕士学位论文中文摘要字数一般为 1000 字左右，博士学位论文中文摘要字数一般为 1500 字左右。英文摘要内容与中文摘要内容保持一致，翻译力求简明精准。摘要的正文下方需注明论文的关键词，关键词一般为 3 ~ 8 个，关键词和关键词之间用逗号并空一格。

中文摘要格式要求为：宋体小四、两端对齐、首行缩进 2 字符，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 0 磅，段后 0 磅。

英文摘要格式要求为：Times New Roman、小四、两端对齐、首行不缩进，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 0 磅，段后 0 磅，段与段之间空一行。

关键词：XXX, XXX, XXX, XXX, XXX

ABSTRACT

The Abstract is a brief description of a thesis or dissertation without notes or comments. It represents concisely the research purpose, content, method, result and conclusion of the thesis or dissertation with emphasis on its innovative findings and perspectives. The Abstract Part consists of both the Chinese abstract and the English abstract. The Chinese abstract should have the length of approximately 1000 Chinese characters for a master thesis and 1500 for a Ph.D. dissertation. The English abstract should be consistent with the Chinese one in content. The keywords of a thesis or dissertation should be listed below the main body of the abstract, separated by commas and a space. The number of the keywords is typically 3 to 5.

The format of the Chinese Abstract is what follows: Song Ti, Small 4, justified, 2 characters indented in the first line, line spacing at a fixed value of 20 pounds, and paragraph spacing section at 0 pound.

The format of the English Abstract is what follows: Times New Roman, Small 4, justified, not indented in the first line, line spacing at a fixed value of 20 pounds, and paragraph spacing section at 0 pound with a blank line between paragraphs.

Keywords: XXX, XXX, XXX, XXX, XXX

插图索引

1.1	传统光学成像模型示意图	1
1.2	数字光学相位共轭示意图	4
2.1	数字光学相位共轭示意图	7
3.1	透过散射介质的光谱信息和结构信息恢复的结构示意图	10
3.2	散斑的波长多样性	11
3.3	散斑的相关系数	12
3.4	散斑相关成像模型	12
5.1	插图示例	23
6.1	在线 Boosting 算法流程图	27
6.2	跟踪过程中代表性序列帧及对比算法跟踪结果	28

表格索引

5.1	表格示例	24
6.1	8 种算法 20 个像素偏差内的准确率	27

符号对照表

符号	符号名称
\in	属于
\mathbb{R}	实数集
w	权重
x	样本
y	标签
M	特征维数
N	样本数量
η	学习率
\mathcal{F}^{-1}	逆傅里叶变换
γ	弱分类器更新率

缩略语对照表

缩略语	英文全称	中文对照
SVM	Support Vector Machine	支持向量机
EM	expectation-maximization	最大期望
WTS	Weighted Tensor Subspace	加权张量子空间
PCA	Principal Component Analysis	主成分分析
IPCA	Incremental PCA	增量主成分分析
HOG	Histogram of Oriented Gradient	方向梯度直方图
2D-LDA	2D Fisher Linear Discriminant Analysis	二维 Fisher 线性判别分析
AVT	Attentional Visual Tracking	注意视觉跟踪
RF	Random Forest	随机森林
FFT	Fast Fourier Transformation	快速傅里叶变换
MOSSE	Minimum Output Sum of Squared Error filter	最小平方误差滤波器
CFT	Correlation Filter Tracker	相关滤波跟踪器
DFT	Discrete Fourier Transform	离散傅里叶变换
KCF	Kernelized Correlation Filter	核相关滤波器
CLE	Center Location Error	中心位置误差
OP	Overlap Precision	重叠精度
DP	Distance Precision	距离精度
ASMM	Atkinson-Shiffrin Memory Model	AtkinsonShiffrin 内存模型
MUSTer	MULTi-Store Tracker	多贮存跟踪器
KNN	K-Nearest Neighbor	K-最近邻
HOG	Histogram of Oriented Gradient	方向梯度直方图
ALM	Augmented Lagrange Method	增强拉格朗日方法
ADMM	Alternating Direction Method of Multipliers	交替方向乘子算法

目录

摘要.....	I
ABSTRACT	III
插图索引.....	V
表格索引.....	VII
符号对照表.....	IX
缩略语对照表.....	XI
第一章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 基于波前整形的散射成像技术	2
1.2.1 光学相位共轭	3
1.2.2 基于反馈优化波前整形的散射介质成像技术	4
第二章 绪论	5
2.1 基于波前整形的散射成像技术	6
2.1.1 光学相位共轭	6
2.1.2 基于反馈优化波前整形的散射介质成像技术	8
第三章 透过散射介质的光谱信恢复和空间信息恢复	9
3.1 基于光谱传输矩阵和散斑相关成像方法的原理介绍	10
3.1.1 基于光谱传输矩阵的光谱重建模型	10
3.1.2 基于光学记忆效应的散斑相关成像模型	12
3.2 声明	14
3.3 摘要	14
3.4 插图索引	14
3.5 表格索引	14
3.6 符号对照表	15
3.7 缩略语对照表	15
3.8 目录	15
3.9 正文	15
3.9.1 绪论.....	16
3.9.2 各章节.....	16
3.9.3 结论.....	17

3.10 参考文献	17
3.11 致谢	18
3.12 作者简介	18
3.13 其他	19
第四章 研究生学位论文的编辑、打印、装订要求	21
4.1 学位论文封面的编辑和打印要求	21
4.2 学位论文的版面设置要求	21
4.3 学位论文的打印、装订要求	21
4.4 其他说明	22
第五章 图、表、公式示例	23
第六章 补充示例	25
6.1 公式	25
6.1.1 带约束条件的公式	25
6.1.2 多等式	25
6.1.3 长公式	26
6.1.4 矩阵	26
6.2 图	26
6.2.1 tikz 画图	26
6.2.2 多图排列	26
6.3 表格	26
6.4 文献引用	29
参考文献	31
致谢	33
作者简介	35

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

生活中，我们观察物体、辨别物体总是遵循“光沿直线传播”、“所见即所得”的传统光学成像规律，常见的视觉成像系统像人眼、照相机以及光学成像工具如放大镜、显微镜和望远镜等都以此为物理基础。如图1.1所示的传统光学成像模型，传统光学成像主要通过提取弹道光（或抑制散射光）的方式解决透过无散射（或者弱散射）介质的成像问题。在传统成像模型中的核心点在于“点物成点像”，直接对信息进行获取，进而对所获取的信息进行直接呈现。然而，在我们的生活，经常需要在复杂且干扰的环境下进行信息获取，如生物组织、烟尘和云雾等传输介质都会对光线的传播造成干扰进而导致传播方向的改变。当光线在此类介质传播时，其传播方向被多次随机改变（此种现象被称为“散射”），进而导致传统光学成像规律失效。其主要原因是光在强散射介质中传播时，介质中大小为波长量级的粒子对入射光波产生的散射作用使原本有序的波前相位产生严重畸变，出射光场变得随机且紊乱，最终在观测面上只能接收到散斑图案，难以实现对目标的直接观测或成像。因此，散射效应成为制约透过散射介质成像技术发展的瓶颈和关键问题。

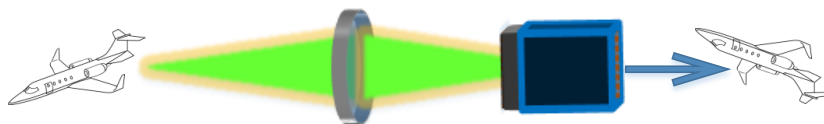


图 1.1 传统光学成像模型示意图

近年来，随着计算机技术飞速发展、介观物理研究的深入、计算成像思想的完善和图像处理技术的发展，形成以物理机制为基础的计算光学成像技术。计算光学成像技术作为新型成像手段，不仅推动了传统成像的发展，而且在解决散射成像方面表现出了得天独厚的优势。经过各国科学家们的不懈努力，计算成像理论以及相关实验技术迅速发展，取得了许多突破性研究成果。在弹道光提取方面，如：自适应光学成像技术 (Adaptive optics technique)、门选通技术、光学相干层析 (Optical coherence tomography)、共聚焦显微 (Confocal microscopy)、多光子显微 (Multiphoton microscopy)、光声显微 (Optoacoustic microscopy)、合荧光分子层析 (Hybrid fluorescence molecular tomography)、多光谱光声层析 (Multispectral optoacoustic tomography) 等光学成像技术的发展及应用，解决了天文成像、水下探测和生物成像等领域的关键问题。在散射光利用方面：随着空间光调制器 (Spatial light modulator, SLM)、数字微镜器件 (Digital

micromirror device, DMD)、微机电系统调制器 (Micro electro mechanical system, MEMS) 等数字波前整形器件的出现, 促使了计算成像技术和散射成像技术有机的结合, 涌现出了许多新型光学成像技术, 如: 光学相位共轭 (Optical phase conjugation)、波前反馈调节 (Wavefront shaping technique)、基于光学传输矩阵 (Transmission matrix) 等, 极大地促进了散射成像技术在显微成像领域的应用。与此同时, 随着对光学记忆效应 (Optical memory effect) 的深入研究, 散斑相关成像技术的提出为透过散射介质成像打开了崭新的局面。随着计算光学成像的进一步发展, 基于点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 工程和深度学习的方法, 也成为了解决透过散射介质成像的重要途径。

纵观散射成像的发展历程, 随着对散射机理研究的不断深入, 散射成像技术已从早期基础理论研究到实验室下模型验证研究再到透过散射介质成像应用研究。早期的散射成像技术注重于克服散射或抑制散射, 通过弹道光与散射光的分离, 最终获取有效的目标信息。现阶段的散射成像技术侧重于散射光的利用, 充分挖掘散射光的特性, 实现从不可探测到可探测质的飞跃。值得注意的是, 散射成像技术不仅在显微成像和超分辨成像方面有着广泛的应用, 而且也将在全息成像、光纤成像和光通讯等领域扮演着重要的角色。

现有透过散射介质成像方法主要有波前整形和基于光学记忆效应的散射成像技术。波前整形技术, 包含光学相位共轭、基于反馈优化的波前整形和光学传输矩阵技术三部分, 该技术主要研究光波在介质中的传播规律以及特性, 为散射效应的利用奠定基础。基于光学记忆效应的散射成像技术, 包含散斑相关成像技术和点扩散函数工程成像技术两部分, 该技术核心在于对于散斑能量的利用, 利用的散斑分布特点实现透过散射介质成像及相关工作。本文分别对以上方法在散射成像相关成果以及进展进行归纳和总结, 并对未来的发展趋势进行了分析与展望。

1.2 基于波前整形的散射成像技术

在散射介质中传播受到散射效应的影响, 在像面形成系列散斑。如何定量或定性描述散射介质在光传播过程中的影响成为利用光散射效应的关键问题。虽然光在多重散射介质中传播具有很高的随机性, 但当散射介质处稳定于状态时, 光在散射介质中的传播具有确定性。散射介质的特性可以与多模光纤进行类比, 其输出光场可看作多种模式之间的耦合与叠加。为了精确地描述散射介质在光传播过程的作用, 光学传输矩阵思想被提出, 有效地将入射光场和出射光场联系起来。近年来, 随着光散射理论和实验技术的飞速发展, 研究人员基于光学相位共轭、反馈优化的波前整形和光学传输矩阵等技术, 实现了透过散射介质的聚焦或者成像。在未获得完善的光学传输矩阵的前提下, 为实现透过散射介质聚焦或成像, 通常采用光学相位共轭技术或者基于

反馈优化的波前整形技术；在测得完备的光学矩阵之后，往往利用光学传输矩阵技术能够有效地实现对出射光场的控制。研究表明，波前整形技术在生物医学成像、超分辨成像和光通信等方面有着巨大的应用前景。

1.2.1 光学相位共轭

光学相位共轭技术是时间反演技术在光学领域的应用，最早的光学相位共轭技术通过在照相板上记录全息图来实现。本质上，光学相位共轭技术利用光传播的可逆性，通过获得透过介质后的光场分布，反向输入透射光场的相位共轭波形，重建原始的入射光场。光学相位共轭实现可以分为两步：第一步，光场信息的记录；第二步，相位共轭光的生成。按照相位共轭光产生方式的不同，光学相位共轭技术可以分为非线性光学相位共轭技术和数字光学相位共轭技术两类。前者可以使用数字全息或定量相位成像技术来实现，后者是空间光调制器实现。在实验中，我们通常只能获取介质一面光场信息（或者获取部分入射光和部分散射光），在多重散射材料的情况下（也在混沌腔的情况）甚至有限的相位共轭也可以地重建部分的入射光场信息。依据非线性过程的差异，非线性光学相位共轭技术可以分为：三波混频相位共轭技术、四波混频相位共轭技术、受激布里渊散射相位共轭技术和光折变晶体相位共轭技术。总体而言，非线性光学相位共轭技术实施起来比较复杂，通常需要非线性晶体、特定波长和强激光光源。虽然实施起来比较复杂，但是非线性相位共轭技术自早期以来多用于透过复杂介质聚焦。光折变晶体作为光学相位共轭技术的一种常用手段，虽然其调节速度较慢，但可实现透过厚生物组织的聚焦成像。随着材料技术的飞速发展，许多新型光学共轭材料被研发出来，其调节速度可与 SLM 相媲美。许多增益介质能够提供快速的光学共轭调节，但受到其物理效应的限制，仅适用于窄谱光源。三波混频相位共轭技术具有速度快频带宽的特点，但其有效角度较小。与数字光学相位共轭技术相比，非线性光学相位共轭技术在模式耦合效率方面具有较大优势，往往高出 1 ~ 2 数量级。因此非线性光学相位共轭技术在生物医学方面仍然具有很大的潜力。

由于 SLM 和 DMD 等元件的出现，使数字光学相位共轭调制变成可能，数字光学相位共轭技术的工作原理如图2.1所示。在获得输出场的光场信息后，利用数字元器件产生相位共轭光，进而实现透过散射介质的聚焦和成像。2008 年，Z. Yaqoob 等人首次提出了一种基于光学相位共轭的散射成像模型，通过单次记录光场信息克服介质的散射实现成像。2009 年，Pauriss 等人利用了数字光学相位共轭技术实现了对光纤输出光场的控制和补偿。随后，数字光学相位共轭技术被应用于透过散射介质和多模光纤聚焦。

数字光学相位共轭技术虽然在调制效率方面具有劣势，但是对于透过复杂介质成像方面的应用有着得天独厚的优势。数字光学相位共轭技术利用计算机记录其输

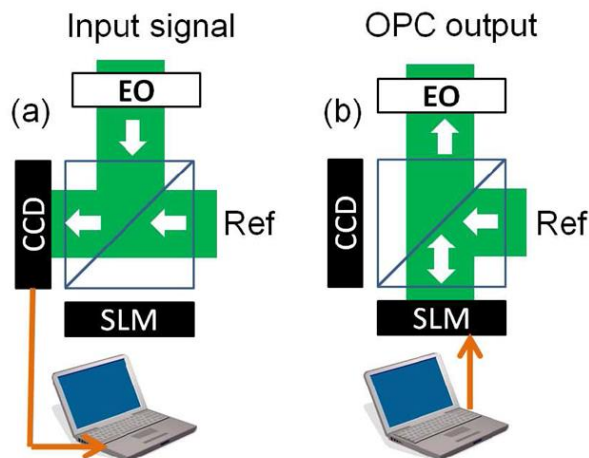


图 1.2 数字光学相位共轭示意图

出光场分布，利用调制器生成共轭光，可以对无数个输入光场进行重构，相较而言，非线性光学相位共轭技术不具备此特点。在未来发展中，如何提高数字光学相位共轭技术的效率问题，将决定数字光学相位共轭技术在未来应用中的地位。

1.2.2 基于反馈优化波前整形的散射介质成像技术

基于反馈优化的波前整形技术利用优化算法（非线性或线性），通过迭代获取到目标光场所对应的最优波前，从而实现透过散射介质聚焦或成像。本质上，基于反馈优化的波前整形技术将散射介质对于光场的调制过程看作“黑箱”处理，通过迭代算法获取相应的波前，进而实现了对于输出光场的模式以及不同模式之间耦合的控制。

2007 年，A. P. Mosk 课题组利用 SLM 对入射到随机散射介质中的光波进行波前相位调制，采用反馈控制算法对空间光调制器的 SLM 像素进行逐个优化，通过不断迭代的方式获取最优波前，所得的最优波前幅值或相位可以适当补偿由介质散射引起的波前畸变，最终得到了亮度高于调制前散斑 1000 倍的聚焦光斑，远远优于光学透镜的聚焦效果，实验装置和实验结果分别如图 2 和图 3 所示。

第二章 绪论

生活中,我们观察物体、辨别物体总是遵循“光沿直线传播”、“所见即所得”的传统光学成像规律,常见的视觉成像系统像人眼、照相机以及光学成像工具如放大镜、显微镜和望远镜等都以此为物理基础。传统光学成像主要通过提取弹道光(或抑制散射光)的方式解决透过无散射(或者弱散射)介质的成像问题。当光透过生物组织、烟尘和云雾等强散射介质时,传统光学成像规律失效。其主要原因是光在强散射介质中传播时,介质中大小为波长量级的粒子对入射光波产生的散射作用使原本有序的波前相位产生严重畸变,出射光场变得随机且紊乱,最终在观测面上只能接收到散斑图案,难以实现对目标的观测或成像。因此,散射效应成为制约透过散射介质成像技术发展的瓶颈和关键问题。

近年来,随着计算机技术飞速发展、介观物理研究的深入、计算成像思想的完善和图像处理技术的发展,形成以物理机制为基础的计算光学成像技术。计算光学成像技术作为新型成像手段,不仅推动了传统成像的发展,而且在解决散射成像方面表现出了得天独厚的优势。经过各国科学家们的不懈努力,计算成像理论以及相关实验技术迅速发展,取得了许多突破性研究成果。在弹道光提取方面,如:自适应光学成像技术(Adaptive optics technique)、门选通技术、光学相干层析(Optical coherence tomography)、共聚焦显微(Confocal microscopy)、多光子显微(Multiphoton microscopy)、光声显微(Optoacoustic microscopy)、合荧光分子层析(Hybrid fluorescence molecular tomography)、多光谱光声层析(Multispectral optoacoustic tomography)等光学成像技术的发展及应用,解决了天文成像、水下探测和生物成像等领域的关键问题。在散射光利用方面:随着空间光调制器(Spatial light modulator, SLM)、数字微镜器件(Digital micromirror device, DMD)、微机电系统调制器(Micro electro mechanical system, MEMS)等数字波前整形器件的出现,促使了计算成像技术和散射成像技术有机的结合,涌现出了许多新型光学成像技术,如:光学相位共轭(Optical phase conjugation)、波前反馈调节(Wavefront shaping technique)、基于光学传输矩阵(Transmission matrix)等,极大地促进了散射成像技术在显微成像领域的应用。与此同时,随着对光学记忆效应(Optical memory effect)的深入研究,散斑相关成像技术的提出为透过散射介质成像打开了崭新的局面。随着计算光学成像的进一步发展,基于点扩散函数(Point Spread Function, PSF)工程和深度学习的方法,也成为了解决透过散射介质成像的重要途径。

纵观散射成像的发展历程,随着对散射机理研究的不断深入,散射成像技术已从早期基础理论研究到实验室下模型验证研究再到透过散射介质成像应用研究。早期

的散射成像技术注重于克服散射或抑制散射,通过弹道光与散射光的分离,最终获取有效的目标信息。现阶段的散射成像技术侧重于散射光的利用,充分挖掘散射光的特性,实现从不可探测到可探测质的飞跃。值得注意的是,散射成像技术不仅在显微成像和超分辨成像方面有着广泛的应用,而且也将在全息成像、光纤成像和光通讯等领域扮演着重要的角色。

现有透过散射介质成像方法主要有波前整形和基于光学记忆效应的散射成像技术。波前整形技术,包含光学相位共轭、基于反馈优化的波前整形和光学传输矩阵技术三部分,该技术主要研究光波在介质中的传播规律以及特性,为散射效应的利用奠定基础。基于光学记忆效应的散射成像技术,包含散斑相关成像技术和点扩散函数工程成像技术两部分,该技术核心在于对于散斑能量的利用,利用的散斑分布特点实现透过散射介质成像及相关工作。本文分别对以上方法在散射成像相关成果以及进展进行归纳和总结,并对未来的发展趋势进行了分析与展望。

2.1 基于波前整形的散射成像技术

在散射介质中传播受到散射效应的影响,在像面形成系列散斑。如何定量或定性描述散射介质在光传播过程中的影响成为利用光散射效应的关键问题。虽然光在多重散射介质中传播具有很高的随机性,但当散射介质处稳定于状态时,光在散射介质中的传播具有确定性。散射介质的特性可以与多模光纤进行类比,其输出光场可看作多种模式之间的耦合与叠加。为了精确地描述散射介质在光传播过程的作用,光学传输矩阵思想被提出,有效地将入射光场和出射光场联系起来。近年来,随着光散射理论和实验技术的飞速发展,研究人员基于光学相位共轭、反馈优化的波前整形和光学传输矩阵等技术,实现了透过散射介质的聚焦或者成像。在未获得完善的光学传输矩阵的前提下,为实现透过散射介质聚焦或成像,通常采用光学相位共轭技术或者基于反馈优化的波前整形技术;在测得完备的光学矩阵之后,往往利用光学传输矩阵技术能够有效地实现对出射光场的控制。研究表明,波前整形技术在生物医学成像、超分辨成像和光通信等方面有着巨大的应用前景。

2.1.1 光学相位共轭

光学相位共轭技术是时间反演技术在光学领域的应用,最早的光学相位共轭技术通过在照相板上记录全息图来实现。本质上,光学相位共轭技术利用光传播的可逆性,通过获得透过介质后的光场分布,反向输入透射光场的相位共轭波形,重建原始的入射光场。光学相位共轭实现可以分为两步:第一步,光场信息的记录;第二步,相位共轭光的生成。按照相位共轭光产生方式的不同,光学相位共轭技术可以分

为非线性光学相位共轭技术和数字光学相位共轭技术两类。前者可以使用数字全息或定量相位成像技术来实现，后者是空间光调制器实现。在实验中，我们通常只能获取介质一面光场信息（或者获取部分入射光和部分散射光），在多重散射材料的情况下（也在混沌腔的情况）甚至有限的相位共轭也可以地重建部分的入射光场信息。依据非线性过程的差异，非线性光学相位共轭技术可以分为：三波混频相位共轭技术、四波混频相位共轭技术、受激布里渊散射相位共轭技术和光折变晶体相位共轭技术。总体而言，非线性光学相位共轭技术实施起来比较复杂，通常需要非线性晶体、特定波长和强激光光源。虽然实施起来比较复杂，但是非线性相位共轭技术自早期以来多用于透过复杂介质聚焦。光折变晶体作为光学相位共轭技术的一种常用手段，虽然其调节速度较慢，但可实现透过厚生物组织的聚焦成像。随着材料技术的飞速发展，许多新型光学共轭材料被研发出来，其调节速度可与 SLM 相媲美。许多增益介质能够提供快速的光学共轭调节，但受到其物理效应的限制，仅适用于窄谱光源。三波混频相位共轭技术具有速度快频带宽的特点，但其有效角度较小。与数字光学相位共轭技术相比，非线性光学相位共轭技术在模式耦合效率方面具有较大优势，往往高出 1~2 数量级。因此非线性光学相位共轭技术在生物医学方面仍然具有很大的潜力。

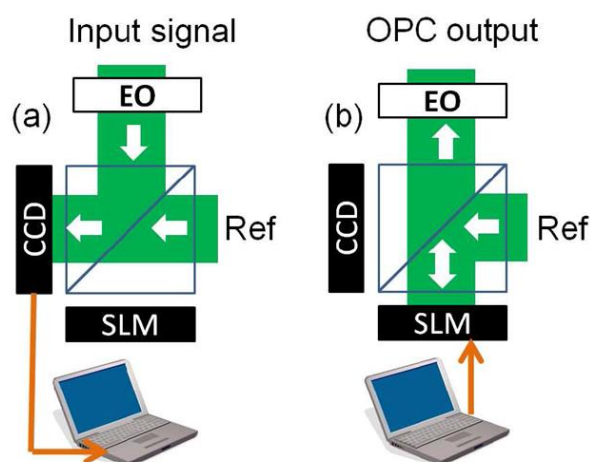


图 2.1 数字光学相位共轭示意图

由于 SLM 和 DMD 等元件的出现，使数字光学相位共轭调制变成可能，数字光学相位共轭技术的工作原理如图2.1所示。在获得输出场的光场信息后，利用数字元器件产生相位共轭光，进而实现透过散射介质的聚焦和成像。2008 年，Z. Yaqoob 等人首次提出了一种基于光学相位共轭的散射成像模型，通过单次记录光场信息克服介质的散射实现成像。2009 年，Pauriss 等人利用了数字光学相位共轭技术实现了对光纤输出光场的控制和补偿。随后，数字光学相位共轭技术被应用于透过散射介质和多模光纤聚焦。

数字光学相位共轭技术虽然在调制效率方面具有劣势，但是对于透过复杂介质

成像方面的应用有着得天独厚的优势。数字光学相位共轭技术利用计算机记录其输出光场分布，利用调制器生成共轭光，可以对无数个输入光场进行重构，相较而言，非线性光学相位共轭技术不具备此特点。在未来发展中，如何提高数字光学相位共轭技术的效率问题，将决定数字光学相位共轭技术在未来应用中的地位。

2.1.2 基于反馈优化波前整形的散射介质成像技术

基于反馈优化的波前整形技术利用优化算法（非线性或线性），通过迭代获取到目标光场所对应的最优波前，从而实现透过散射介质聚焦或成像。本质上，基于反馈优化的波前整形技术将散射介质对于光场的调制过程看作“黑箱”处理，通过迭代算法获取相应的波前，进而实现了对于输出光场的模式以及不同模式之间耦合的控制。

2007 年，A. P. Mosk 课题组利用 SLM 对入射到随机散射介质中的光波进行波前相位调制，采用反馈控制算法对空间光调制器的 SLM 像素进行逐个优化，通过不断迭代的方式获取最优波前，所得的最优波前幅值或相位可以适当补偿由介质散射引起的波前畸变，最终得到了亮度高于调制前散斑 1000 倍的聚焦光斑，远远优于光学透镜的聚焦效果，实验装置和实验结果分别如图 2 和图 3 所示。

第三章 透过散射介质的光谱信恢复和空间信息恢复

前面的章节中，我们已经介绍了散射成像的研究背景、发展现状及研究意义，并且对散斑的基本概念与特性进行了阐述，同时介绍了本章工作所依赖的基本物理特性散斑的光谱多样性及光学记忆效应。

光谱成像已经发展多年，它在文成像到地球观测，以及生物医学成像等领域有着重要的应用前景。然而，当光线通过生物组织或毛玻璃等混浊介质时，会被强烈散射并扩散成复杂且杂乱的散斑图案，这使得利用目标的光谱信息和空间信息变得困难。虽然，目标的空间信息和光谱信息保存在所获取的散斑图案中，但是，如何有效地利用此类信息变得极为挑战。伴随着对散射特性的深入研究，波前调制技术、光学传输矩阵和散斑相关等技术在透过散射介质成像方面有着重要的应用。然而，波前调制技术需要较长的波前优化过程，且耗时较长，有效地选取恰当的反馈信号对该技术的应用起着决定性的作用。与此同时，波前调制技术的实现往往需要利用光学或声学探针，对聚焦信号实现定位或者引导，才能够有效地实现聚焦。光学传输矩阵技术需要对散射介质的传输矩阵进行测量，记录特定输入信号及其对应的输出信号，通常难以在非入侵的情境下实现成像工作，如：生物成像等。2012年，意大利学者 J.Bertolotti 等人提出了基于“光学记忆效应”（OME）的散斑相关成像方法，通过相关的方式从散斑数据中获取目标的傅里叶振幅，进一步利用相位恢复算法从傅里叶振幅中实现目标的傅里叶相位信息恢复，最终，实现隐藏目标的空间信息重建。然而，此方法需要对入射激光光源进行多角度扫描，其成像质量与角度扫描的数量密切相关。2014年，以色列学者 O.Katz 等人受到天文成像方法的启发，对散斑相关成像方法进行改进，实现了单帧散斑的透过散射介质成像。透过自相关的方法从单帧散斑获取目标的傅里叶振幅信息，然后利用相位恢复算法恢复相应的傅里叶相位信息，进而恢复目标的空间信息。即使能够实现对隐藏目标的散斑成像，但是恢复目标的光谱信息仍极其困难。在光谱域，当单色光通过散射介质后，其散斑图像的强度分布与与入射光的波长相关。2013年，B.Redding 等人提出了基于介质光谱传输矩阵光谱重建方法。此方法将不同单色光通过散射介质的散斑作为该波长的指纹，并将不同的光谱指纹存储在矩阵中，称为光谱传输矩阵。当有未知光谱信息的光源输入系统时，只需要记录其相应的散斑并对其进行求解，便可以实现对未知光源的光谱信息恢复。在随后的发展中，许多学者将此光谱重建的方法的应用扩展到无序光子晶体、多模光纤和散射介质等。然而，此方法只能对目标信息的光谱信息进行恢复，无法实现目标的结构信息的恢复。

在本章中，我们首先介绍了基于光谱传输矩阵的光谱信息恢复方法和基于光学记忆效应的散斑相关成像方法的基本原理，并对其进行了仿真复现；其次，我们对两种方法进行了结合，设计了一个双臂系统实现透过散射介质实现光谱成像。对于我们的系统，一个臂用于通过光谱传输矩阵的方式实现光谱信息重建，另一臂用于通过散斑相关成像方法实现目标结构信息重建。最后，我们进行了实验，验证了该系统能够有效地实现目标光谱信息重建和空间信息重建。由于散射介质选择的多样性，该系统在低造价的成本下，实现了对目标结构和光谱信息的重建。

3.1 基于光谱传输矩阵和散斑相关成像方法的原理介绍

图3.1所示为本章所要描述的透过散射介质的光谱信息和结构信息恢复的结构示意图。输入光通过光学准直器照明目标，然后又分束镜将来自于目标的光束分为两束，一束进入光谱测量臂，另外一束进入结构信息重建臂。在光谱臂中，光束被由单模光纤和透镜进行收集并准直，然后透过散射介质，被相机所探测。在成像臂中，光束直接照明散射介质并透过散射介质，然后由相机接收散射后的散斑信息。在以下部分，我们分别对光谱重建的数学模型和散斑相关成像数模型进行描述。

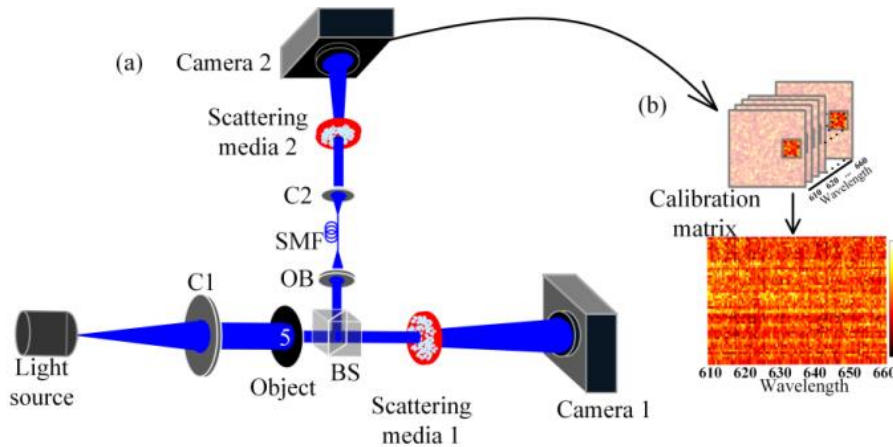


图 3.1 透过散射介质的光谱信息和结构信息恢复的结构示意图

3.1.1 基于光谱传输矩阵的光谱重建模型

散斑图像中的强度分布取决于照明的角度、观察角度和入射光的波长等因素。在本小节中，我们只对入射光的波长变化进行讨论。首先，我们需要引入散斑的光谱多样性概念。如图3.2所示的系统中，照明光源与散射介质之间的距离为 d ，散射介质与相机之间的距离为 S_0 ，当特定波长以固定的角度照明散射介质时，散射光被位于介质后表面距离为 S_0 相机接收。在此，我们认为此类散射介质的散射效应随着波长的改

变而变化。我们在惠更斯-菲尼尔近似条件下，相机所接收的散斑图像可以表示为：

$$E(r_c, \lambda) = A \iint E(r_o, \lambda) e^{\frac{ik}{2d}(r_s - r_o)^2} P_{up.}(r_s, \lambda) T(r_s, \lambda) e^{\frac{ik}{2S_o}(r_c - r_s)^2} dr_o dr_s, \quad (3-1)$$

其中， $k = 2\pi/\lambda$ ， r_c 、 r_o 和 r_s 分别表示相机平面，光入射面和散射介质平面的坐标， $P_{up.}(r_s, \lambda)$ 为散射介质的孔径函数， $T(r_s, \lambda)$ 为介质的散射作用。

我们固定公式 (3-1) 中的除波长以外测参数，分析波长改变对散斑分布的影响。首先，我们假设散射介质对于不同波长光引起的相位变化相同。在此假设下，波长的改变，会引起散斑图案的空间缩放。其次，对于散射介质来说，其散射效应取决于波长。换言之，对于不同波长入射光由散射介质引起的相位畸变不同，这样会导致所接受散斑图案分布发生变化，而非简单的缩放。但是对于实际应用中，往往两种效应同时存在，或者往往更复杂，此种效应被称为散斑的波长多样性。同时我们也进行了相应的仿真，分析波长改变引起的散斑之间的相关系数的改变，仿真结果如图3.3所示。如何有效地利用散斑的波长多样性，将对散斑的波长信息利用有着重要的意义。

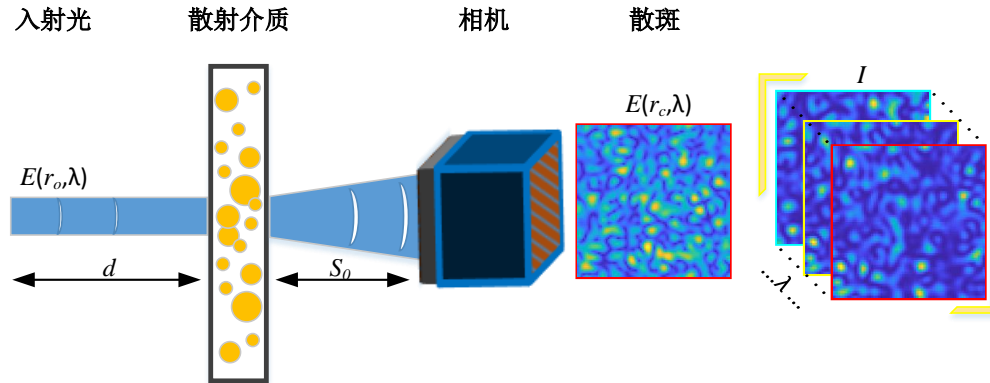


图 3.2 散斑的波长多样性

如果我们对散射介质的光谱指纹进行标定，并将不同的光谱指纹存储在矩阵中，此矩阵称为光谱传输矩阵。在此情况下，在获得未知光源照射散射介质所获得的散斑后，是否能够光谱传输矩阵和此散斑对未知光源的光谱信息进行重建？答案是可以。如图3.1b所示，将不同的光谱指纹转换行向量，并按照光谱信息存储在矩阵 Φ 中，当获取未知光源对应的散斑时，同样将其转换为向量 I 。所以，其输入信号的光谱 S 可以表示为： $I = \Phi S$ ，对矩阵进行左乘求逆，并求出最小二乘解： $S = \Phi^{-1} I$ 。值得强调的是，该光谱重建方法不仅局限于对于以标定的单色光谱信号进行重建，同时也可应用于连续光谱信号。上述的光谱重建问题可以为更普遍的最小化问题： $s_0 = \arg \min_s \|I - \Phi S\|_2$ ，其中 $\|\cdot\|_2$ 表示 $l-2$ 范数， s_0 表示所重建的光谱信号，不同的最小化优化算法可以被采用解决此问题。

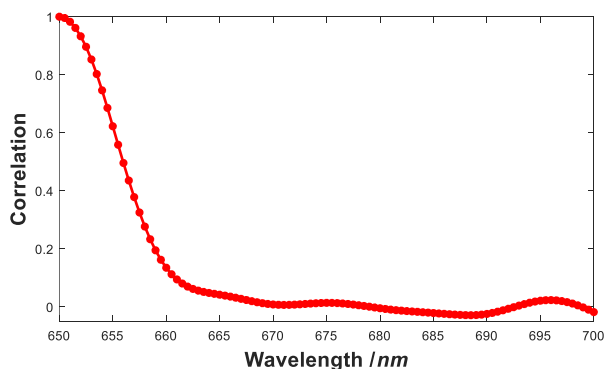


图 3.3 散斑的相关系数

3.1.2 基于光学记忆效应的散斑相关成像模型

图3.4所示为基于光学记忆相应的散斑相关成像基本模型，目标与散射介质之间的距离为 d ，散射介质与相机之间的距离为 S_0 。目标由空间非相干光源照明提供照明，目标所发出的光经过散射介质后，被相机所接收。当物体位于此散射介质的 OME 范围之内时，由于 OME 范围内的点扩散函数具有空间平移不变性，相机所探测到的散斑可以表示为：

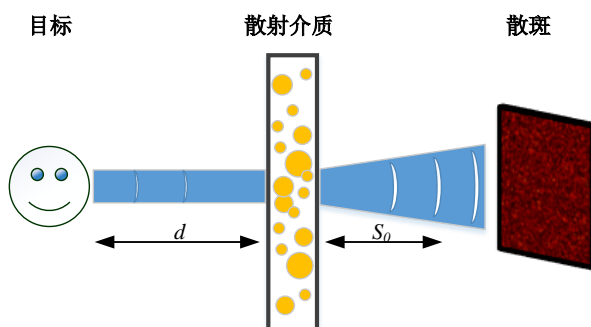


图 3.4 散斑相关成像模型

$$I = O * S \quad (3-2)$$

其中， $*$ 为卷积运算， I 表示相机散斑， O 表示目标和 S 表示系统的 PSF。

透过散射成像的数学模型的理论基础如下，目标可以分解为不同的点源目标，当不同的点源目标为与散射介质的光学记忆效应范围之内时，不同点源目标所对于系统的响应函数可以近似看作不同的散斑在空间的平移。假设所有的点源目标被同时点亮时，相机所接收到的图像为不同点源目标所对应散斑的非相干叠加。所以，光学记忆效应范围内目标的非相干成像模型可以卷积的形式进行表示： $I = O * S$ 。但是值得注意的是，大多是散射介质的光学记忆效应范围是有限的，当目标的尺寸超过光学记忆效应范围时，此时卷积模型需要加入新的限制条件。成像系统的放大率 M 取

决于物距 d 和相距 S_0 :

$$M = \frac{d}{S_0} \quad (3-3)$$

成像系统的分辨率 $\Delta\theta$ 可以表示为:

$$\Delta\theta \propto \frac{\lambda}{nD} \quad (3-4)$$

其中, \propto 表示正比关系, λ 为照明光源的波长, n 表示光经过散射介质后的介质折射率, D 表示散射介质的有效孔径, 孔径的大小可以通过加载光阑实现控制。

上述部分中, 我们具体描述了基于光学记忆效应的散射基本成像模型, 如公式 (3-2) 所示, 当获得散斑图像后如何恢复图像将在接下来部分进行描述。意大利学者 J.Bertolotti, 以色列学者 O.Katz 等人先后基于散斑自相关的特性, 提出了基于光学散斑自相关的图像重建算法。当相机获得散斑图案后, 散斑的自相关可以表示为:

$$\begin{aligned} I \star I &= (O \star S) \star (O \star S) \\ &= (O \star O) \star (S \star S) \end{aligned} \quad (3-5)$$

其中, \star 表示自相关运算。由公式 (3-5) 可知, 散斑的自相关可以表示为目标的自相关与系统 PSF 自相关的卷积。当前成像系统 PSF 的自相关 ($S \star S$) 可以近似为 δ 函数。所以, 公式 (3-5) 可以简化为:

$$I \star I = (O \star O) + C \quad (3-6)$$

其中, C 表示自相关计算中的背景常数项。通常, 在自相关图像恢复中, 我们需要将背景常数项进行剔除。如果对公式 (3-6) 左右两边同时进行傅里叶变换, 我们会获得什么呢? 庆幸的是, 我们获得了一下公式:

$$\mathcal{F}(I \star I) = \mathcal{F}(O \star O) \quad (3-7)$$

公式 (3-7) 继续可以简化为:

$$\begin{aligned} |\mathcal{F}(O)| &= \sqrt{\mathcal{F}(O \star O)} \\ &= \sqrt{\mathcal{F}(I \star I)} \end{aligned} \quad (3-8)$$

根据公式 (3-8) 可知, 我们可以通过计算的方式从散斑图像中获得隐藏目标的傅里叶振幅信息, 当获得目标的傅里叶振幅信息之后, 仍然缺失的是目标的傅里叶相位信息。图像恢复问题已经被转换为依据傅里叶振幅信息恢复傅里叶相位信息的问题, 如我们所期望的, 此类相位恢复问题在相位中属于常见问题。

3.2 声明

声明是对学位论文创新性和使用授权的声明和说明，论文提交图书馆和存档时作者本人和指导教师必须签名确认。

声明部分标题字体为宋体，字号为四号加粗，居中排列，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 0 磅，段后 0 磅；正文字体为宋体，字号为小四号，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 0 磅，段后 0 磅；标题与正文之间空一行，签名行与正文之间空一行，日期行与签名行之间空一行。

3.3 摘要

摘要是学位论文的内容不加注释和评论的简短陈述，简明扼要陈述学位论文的研究目的、内容、方法、成果和结论，重点突出学位论文的创造性成果和观点。摘要包括中文摘要和英文摘要，硕士学位论文中文摘要字数一般为 1000 字左右，博士学位论文中文摘要字数一般为 1500 字左右。英文摘要内容与中文摘要内容保持一致，翻译力求简明精准。摘要的正文下方需注明论文的关键词，关键词一般为 3 ~ 8 个，关键词和关键词之间用逗号并空一格。

中文摘要标题字体为黑体，字号为三号，居中排列，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 24 磅，段后 18 磅；正文字体为宋体，字号为小四号，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 0 磅，段后 0 磅；关键词和正文之间空一行，关键词字体为宋体，字号为小四号，标题加粗。英文摘要标题字体为 Times New Roman，字号为三号，居中排列，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 24 磅，段后 18 磅；正文的每一段落首行不空格，段落与段落之间空一行；正文字体为 Times New Roman，字号为小四号，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 0 磅，段后 0 磅；关键词字体为 Times New Roman，字号为小四号，标题加粗。

3.4 插图索引

学位论文中插图的目录索引。插图索引标题字体为黑体，字号为三号，居中排列，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 24 磅，段后 18 磅；正文内容字体为宋体，字号为小四号，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 0 磅，段后 0 磅。

3.5 表格索引

学位论文中表格的目录索引。表格索引标题字体为黑体，字号为三号，居中排列，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 24 磅，段后 18 磅；正文内容字体为宋体，字

号为小四号，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 0 磅，段后 0 磅。

3.6 符号对照表

学位论文中符号代表的意义及单位（或量纲）的说明。符号对照表标题字体为黑体，字号为三号，居中排列，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 24 磅，段后 18 磅；正文内容字体为宋体，字号为小四号，行距为固定值 20 磅。

3.7 缩略语对照表

学位论文中缩略语代表意义的说明。缩略语按照英文单词首字母顺序排列，对照表标题字体为黑体，字号为三号，居中排列，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 24 磅，段后 18 磅；正文内容中文字体为宋体，字号为小四号，英文字体为 Times New Roman，字号为小四号，行距为固定值 20 磅。

3.8 目录

目录是学位论文的提纲，是论文各组成部分的小标题，应分别依次列出并注明页码。各级标题分别以第一章、1.1、1.1.1 等数字依次标出，目录中最多列出三级标题，正文中如果确需四级标题，用（1）、（2）形式标出。学位论文的前置部分（摘要、插图索引、表格索引、符号对照表、缩略语对照表）和学位论文的主体部分（正文、参考文献、致谢、作者简介）都要在目录中列出。

目录标题字体为黑体，字号为三号，居中排列，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 24 磅，段后 18 磅；目录内容中一级标题字体为黑体，字号为小四号，其余标题字体为宋体，字号为小四号。

3.9 正文

正文是学位论文的主体和核心部分。正文的一级标题居中排列，字体为黑体，字号为三号，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 24 磅，段后 18 磅；二级标题不缩进，字体为宋体加粗，字号为小三号，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 18 磅，段后 12 磅；三级标题缩进 2 字符，字体为宋体，字号为四号加粗，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 12 磅，段后 6 磅；正文内容字体为宋体，字号为小四号，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 0 磅，段后 0 磅。正文一般包括以下几个方面：

3.9.1 绪论

绪论是学位论文主体部分的开端，切忌与摘要雷同或成为摘要的注解。绪论除了要说明论文的研究目的、研究方法和研究结果外，还应评述与论文研究内容相关的国内外研究现状和相关领域中已有的研究成果；其次还要介绍本项研究工作的前提和任务、理论依据、实验基础、涉及范围、预期结果以及该论文在已有基础上所要解决的问题。

3.9.2 各章节

各章节一般由标题、文字叙述、图、表、公式等构成，章节内容总体要求立论正确，逻辑清晰，数据可靠，层次分明，文字通畅，编排规范。论文中若有与指导教师或他人共同研究的成果，必须明确标注；如果引用他人的结论，必须明确注明出处，并与参考文献保持一致。

(1) 图：包括曲线图、示意图、流程图、框图等。图序号一律用阿拉伯数字分章依序编码，如：图 1.3、图 2.11。每一个图应有简短确切的图名，连同图序号置于图的正下方。图名称、图中的内容字号为五号，中文字体为宋体，英文字体为 Times New Roman，行距一般为单倍行距。图中坐标上标注的符号和缩略词必须与正文保持一致。引用图应在图题右上角标出文献来源；曲线图的纵横坐标必须标注“量、标准规定符号、单位”，这三者只有在不必要标明（如无量纲等）的情况下方可省略。

(2) 表：包括分类项目和数据，一般要求分类项目由左至右横排，数据从上到下竖列。分类项目横排中必须标明符号或单位，竖列的数据栏中不要出现“同上”、“同左”等词语，一律要填写具体的数字或文字。表序号一律用阿拉伯数字分章依序编码，如：表 2.5、表 10.3。每一个表格应有简短确切的题名，连同表序号置于表的正上方。表名称、表中的内容字号为五号，中文字体为宋体，英文字体为 Times New Roman，行距一般与正文保持一致。

(3) 公式：正文中的公式、算式、方程式等必须编排序号，序号一律用阿拉伯数字分章依序编码，如：(3-32)、(6-21)。对于较长的公式，另起行居中横排，只可在符号处（如：+、-、*、/、<> 等）转行。公式序号标注于该式所在行（当有续行时，应标注于最后一行）的最右边。连续性的公式在“=”处排列整齐。大于 999 的整数或多于三位的小数，一律用半个阿拉伯数字符的小间隔分开；小于 1 的数应将 0 置于小数点之前。公式的行距一般为单倍行距。

(4) 计量单位：学位论文中出现的计量单位一律采用国务院 1984 年 2 月 27 日发布的《中华人民共和国法定计量单位》标准。

3.9.3 结论

结论是学位论文最终和总体的结论，不是正文中各段的小结的简单重复，应准确、精炼、完整，其中要着重阐述作者研究的创造性成果以及在本研究领域中的重大意义，还可提出有待进一步研究和探讨的问题。

3.10 参考文献

参考文献是文中引用的有具体文字来源的文献集合，博士学位论文参考文献一般不少于 80 篇，其中近 5 年的参考文献不少于 20 篇，硕士学位论文参考文献一般不少于 30 篇，其中近 5 年的参考文献不少于 5 篇。参考文献标题字体为黑体，字号为三号，居中排列，段落间距为段前 24 磅，段后 18 磅；参考文献若是中文文献，字体为宋体，字号为五号，若是英文文献，字体为 Times New Roman，字号为五号。学位论文的撰写要本着严谨求实的科学态度，凡有引用他人成果之处，引用处右上角用方括号标注阿拉伯数字编排的序号（必须与参考文献一致），同时所有引用的文献必须用全称，不能缩写，并按论文中所引用的顺序列于文末。引用文献的作者不超过 3 位时全部列出，超过时列前 3 位，后加“等”字或“et al.”。参考文献的著录要符合《文后参考文献著录规则》（GB/T7714-2005）要求：

（1）期刊(报纸)参考文献：[序号] 主要责任者. 文献名称 [文献类别代码]. 期刊(报纸) 名, 年份, 卷(期): 引文页码.

（2）专著参考文献：[序号] 主要责任者. 专著名称 [文献类别代码]. 其他责任者. 出版地: 出版单位, 出版年份.

（3）专利参考文献：[序号] 主要责任者. 专利名称: 国别, 专利号 [文献类别代码]. 出版日期.

（4）技术标准参考文献：[序号] 起草责任者. 标准代号-标准顺序号-发布年. 标准名称 [文献类别代码]. 出版地: 出版单位, 出版年份.

（5）电子参考文献：[序号] 主要责任者. 题名 [文献类别代码]. 获取和访问路径. [引用日期].

（6）会议论文集参考文献：[序号] 编者. 论文集名. (供选择项: 会议名, 会址, 开会年) 出版地: 出版者, 出版年份.

（7）学位论文参考文献：[序号] 主要责任者. 文献题名 [文献类别代码]. 保存地: 保存单位, 年份.

（8）国际、国家标准参考文献：[序号] 标准代号. 标准名称 [文献类别代码]. 出版地: 出版者, 出版年.

（9）报告类参考文献：[序号] 主要责任者. 文献题名 [文献类别代码]. 报告地: 报

告会主办单位, 年份.

参考文献著录中的文献类别代码:

- (1) 普通图书: M
- (2) 会议录: C
- (3) 汇编: G
- (4) 报纸: N
- (5) 期刊: J
- (6) 学位论文: D
- (7) 报告: R
- (8) 标准: S
- (9) 专利: P
- (10) 数据库: DB
- (11) 计算机程序: CP
- (12) 电子公告: EB

载体类型:

网络: OL

磁带: MT

磁盘: MK

光盘: CD

3.11 致谢

作者对完成论文提供帮助和支持的组织和个人表示感谢的文字记载。致谢标题字体为黑体, 字号为三号, 居中排列, 行距为固定值 20 磅, 段落间距为段前 24 磅, 段后 18 磅; 正文内容字体为宋体, 字号为小四号, 行距为固定值 20 磅, 段落间距为段前 0 磅, 段后 0 磅。

3.12 作者简介

对作者的简要介绍, 主要包括个人基本情况、教育背景、攻读博士/硕士学位期间的研究成果等三个部分内容。攻读博士/硕士学位期间的研究成果是指本人攻读博士/硕士学位期间发表(或录用)的学术论文, 申请(授权)专利、参与的科研项目及科研获奖等情况, 分别按时间顺序列出。其中, 发表论文、申请(授权)专利、科研获奖只列出作者排名前 3 名的, 参与的科研项目按重要程度最多列出 5 项。作者

简介标题字体为黑体，字号为三号，居中排列，行距为固定值 20 磅，段落间距为段前 24 磅，段后 18 磅。作者简介的正文内容严格按照本模板中的范例书写。

3.13 其他

学位论文中如果需要注释，可作为脚注在页下分别著录，切忌在文中注释；如果有附录部分，可编写在正文之后，与正文连续编页码，每一附录均另页起，附录依次用大写英文字母 A、B、C……编序号，如：附录 A、附录 B 等。

第四章 研究生学位论文的编辑、打印、装订要求

4.1 学位论文封面的编辑和打印要求

学位论文的封面由研究生院按国家规定统一制定印刷，封面内容必须打印，不得手写。

4.2 学位论文的版面设置要求

(1) 行间距：固定值 20 磅（题名页除外）。

(2) 字符间距：标准。

(3) 页眉设置：单面页码页眉标题为章节题目，每一章节的起始页必须在单面页码，双面页码页眉标题统一为“西安电子科技大学博/硕士学位论文”，页眉标题居中排列，字体为宋体，字号为五号。页眉文字下添加双横线，双横线宽度为 0.5 磅，距正文距离为：上下各 1 磅，左右各 4 磅。

(4) 页码设置：学位论文的前置部分和主体部分分开设置页码，前置部分的页码用罗马数字标识，字体为 Times New Roman，字号为小五号；主体部分的页码用阿拉伯数字标识，字体为宋体，字号为小五号。页码统一居于页面底端中部，不加任何修饰。

(5) 页面设置：为了便于装订，要求每页纸的四周留有足够的空白边缘，其中页边距为上 3 厘米、下 2 厘米；内侧 2.5 厘米、外侧 2.5 厘米；装订线为 0.5 厘米；页眉 2 厘米，页脚 1.75 厘米。

4.3 学位论文的打印、装订要求

(1) 打印：学位论文必须用 A4 纸页面排版，双面打印；

(2) 装订：依次按照中文题名页、英文题名页、声明、摘要、插图索引、表格索引、符号对照表、缩略语对照表、目录、正文、附录（可选）、参考文献、致谢、作者简介的顺序，用学校统一印制的学位论文封面装订成册。盲审论文必须删除致谢部分的文字内容（致谢标题须保留）以及封面和研究成果中的作者和指导教师姓名，研究成果列表中应体现作者的排序，如第一作者、第一发明人等。

4.4 其他说明

本规定由研究生院负责解释，从申请 2015 年 9 月毕业和授位的研究生开始执行，其它有关规定同时废止。研究生毕业论文撰写要求参照学位论文撰写要求执行。

第五章 图、表、公式示例

图：包括曲线图、示意图、流程图、框图等。图序号一律用阿拉伯数字分章依序编码，如：图 1.3、图 2.11。

每一个图应有简短确切的图名，连同图序号置于图的正下方。图名称、图中的内容字号为五号，中文字体为宋体，英文字体为 Times New Roman，行距一般为单倍行距。图中坐标上标注的符号和缩略词必须与正文保持一致。引用图应在图题右上角标出文献来源；曲线图的纵横坐标必须标注“量、标准规定符号、单位”，这三者只有在不必要标明（如无量纲等）的情况下方可省略。

图与正文之间一般应空一行。

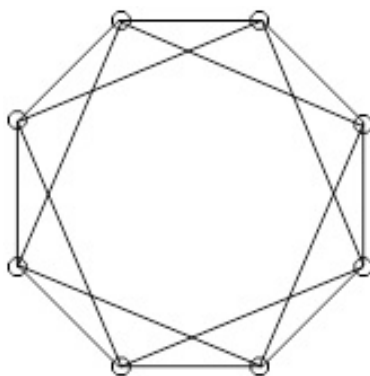


图 5.1 插图示例

公式：正文中的公式、算式、方程式等必须编排序号，序号一律用阿拉伯数字分章依序编码，如：(3-32)、(6-21)。

对于较长的公式，另起行居中横排，只可在符号处（如：+、-、*、/、<> 等）转行。公式序号标注于该式所在行（当有续行时，应标注于最后一行）的最右边。连续性的公式在“=”处排列整齐。大于 999 的整数或多于三位的小数，一律用半个阿拉伯数字的小间隔分开；小于 1 的数应将 0 置 Bonjour

Le service Izly évolue. C’ est pourquoi nous mettons à jour nos Conditions générales d’ utilisation (CGU).

Quelles sont nos principales modifications des CGU ? Le remplacement du rechargement par prélèvement SEPA par la mise en service d’ un nouveau moyen de rechargement : le virement sécurisé, avec notre partenaire Fintecture, La modification des modalités de prévenance lors de la modification des Conditions générales d’ utilisation à l’ initiative de XPOLLENS.

Vous voulez en savoir plus ? Nous vous invitons à consulter à cette page l' intégralité de nos nouvelles conditions générales d' utilisation. Ces modifications entreront en vigueur le 13 septembre 2021. Si vous continuez à utiliser le service Izly après cette date, cela signifie que vous acceptez les conditions générales d' utilisation mises à jour. À tout moment, vous avez la possibilité de récupérer le solde de votre compte et résilier le service, depuis votre espace utilisateur.

Merci de faire partie des utilisateurs Izly ! L' équipe Izly 于小数点之前。公式的行距一般为单倍行距。

公式与正文之间一般应空一行。

$$X_{e1}(s, n_1, k_1) = \binom{k_1}{s} \frac{n_1!}{(n_1 - s)!} \sum_{v=0}^{\min(n_1-s, k_1-s)} (-1)^v \binom{k_1 - s}{v} \times \frac{(n_1 - s)!}{(n_1 - s - v)!} (n_1 - s - v)^{k_1-s-v} \quad (5-1)$$

表：包括分类项目和数据，一般要求分类项目由左至右横排，数据从上到下竖列。

分类项目横排中必须标明符号或单位，竖列的数据栏中不要出现“同上”、“同左”等词语，一律要填写具体的数字或文字。表序号一律用阿拉伯数字分章依序编码，如：表 2.5、表 10.3。

每一个表格应有简短确切的题名，连同表序号置于表的正上方。表名称、表中的内容居中排列，字号为五号，中文字体为宋体，英文字体为 Times New Roman，行距一般与正文保持一致。表格线统一用单线条，磅值为 0.5 磅。

表格与正文之间一般应空一行。

表 5.1 表格示例

馈电方式 电性能参数	探针	环形缝隙	探针和缝隙		缝隙和 CPW	
			探针	缝隙	缝隙	CPW
谐振频率	9.5 GHz	8.8 GHz	9.4 GHz	9.8 GHz	9.2 GHz	9.3 GHz
带宽 S ₁₁ < -10 dB	7.3%	4.5%	6.9%	6.8%	4.9%	5.3%
隔离度 (带内最差)	-16.5 dB	-17 dB	-31 dB		-22 dB	
方向图	不对称	对称	不对称	对称	对称	对称
交叉极化电平	高	低	高	低	低	低

计量单位：学位论文中出现的计量单位一律采用国务院 1984 年 2 月 27 日发布的《中华人民共和国法定计量单位》标准。

第六章 补充示例

前四章给出了学位论文的官方要求。这里补充一些可能用到的示例。

6.1 公式

6.1.1 带约束条件的公式

假设一个数据集 $D = (x_i, y_i), i = 1, \dots, N$ ，其中 (x_i, y_i) 是第 i 个标记示例， x_i 是 M 维输入向量， $y_i \in \{+1, -1\}$ 是相关联的二进制标签， N 是数据大小。形如 $f(x) = w \cdot \Phi(x) + b$ 的 SVM 分类器通过最大化边缘训练，等效为：

$$\min_{w, b, \xi} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N \xi_i \quad (6-1a)$$

$$\text{s.t. } \forall i \in 1, \dots, N : \xi_i \geq 0, y_i(w \cdot \Phi(x) + b) \geq 1 - \xi_i \quad (6-1b)$$

其中 ξ 是松弛变量， C 是样本和边界间允许误差的权衡参数， Φ 是从原始输入空间到特征空间的映射。

6.1.2 多等式

MOSSE 分别对分子和分母进行平均：

$$\begin{cases} \hat{h}^* = \frac{A_t}{B_t} \\ A_t = \eta(\hat{y}_t \odot \hat{x}_t^*) + (1 - \eta)A_t - 1 \\ B_t = \eta(\hat{x}_t \odot \hat{x}_t^*) + (1 - \eta)B_t - 1 \end{cases} \quad (6-2)$$

其中 η 是学习率。这使得最近的帧更受重视，并且让先前帧的影响随时间呈指数级衰减。

6.1.3 长公式

目标的增强拉格朗日可以表示为：

$$\begin{aligned}\mathcal{L}(\hat{g}, h, \hat{\zeta}) = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \|\hat{g}_i(j) - \text{diag}(\hat{x}_i)^\top \hat{g}\|_2^2 + \frac{\lambda}{2} \|h\|_2^2 \\ & + \hat{\zeta}^\top (\hat{g} - \sqrt{D}FP^\top h) \\ & + \frac{\mu}{2} \|\hat{g} - \sqrt{D}FP^\top h\|_2^2\end{aligned}\tag{6-3}$$

6.1.4 矩阵

令基础样本 $x = (x_0, \dots, x_{n-1})$ ，循环矩阵 X 具有以下形式：

$$X = C(x) = \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & \dots & x_{n-1} \\ x_{n-1} & x_0 & \dots & x_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1 & x_2 & \dots & x_0 \end{bmatrix}\tag{6-4}$$

6.2 图

6.2.1 tikz 画图

在线 Boosting 算法流程如图6.1所示。

6.2.2 多图排列

跟踪过程中部分关键帧跟踪结果展示在图6.2中。

6.3 表格

表6.1展示了 8 种算法的 20 个像素偏差内的准确率。

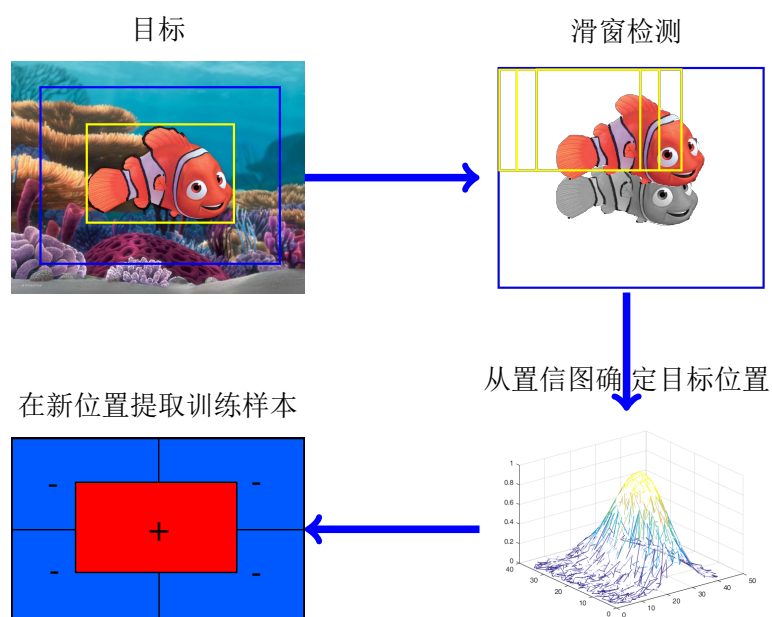


图 6.1 在线 Boosting 算法流程图

表 6.1 8 种算法 20 个像素偏差内的准确率

序列	Frag	OAB	SBT	MIL	Struck	CSK	CFwLB	Ours
Coke	0.034	0.168	0.048	0.117	0.942	0.739	0.918	0.959
David	0.121	0.151	0.204	0.229	0.236	0.236	0.144	0.396
Dog	0.173	0.157	0.079	0.197	0.157	0.144	0.858	0.992
Doll	0.663	0.663	0.149	0.433	0.688	0.218	0.947	0.986
Gym	0.369	0.016	0.046	0.329	0.219	0.091	0.113	0.801
KiteSurf	0.143	0.381	0.369	0.381	0.905	0.321	0.274	0.964
Surfer	0.176	0.045	0.133	0.088	0.157	0.005	0.468	0.997
Sylvester	0.685	0.680	0.430	0.546	0.929	0.717	0.921	0.947
Vase	0.166	0.155	0.129	0.166	0.140	0.166	0.181	0.657
平均	0.281	0.268	0.176	0.276	0.486	0.293	0.536	0.855



图 6.2 跟踪过程中代表性序列帧及对比算法跟踪结果

6.4 文献引用

Li 等^[1]人采用三维时域张量子空间学习进行视觉跟踪。文献^[1]中, 通过基于加权张量子空间 (Weighted Tensor Subspace, WTS) 的增量学习算法来适应跟踪期间的外观变化。

通常的做法是稀疏取样, 即每帧只随机选取若干样本^[2-6]。

参考文献

- [1] 萧钰. 出版业信息化迈入快车道 [EB/OL]. (2001-12-19)[2002-04-15]. <http://www.creader.com/news/20011219/200112190019.html>..
- [2] ZHANG K, ZHANG L, YANG M H. Real-Time Compressive Tracking[C] // Proceedings of the European Conference on Computer Vision : Vol 3. 2012 : 864–877.
- [3] KALAL Z, MIKOLAJCZYK K, MATAS J. Tracking-learning-detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(7) : 1409–1422.
- [4] BABENKO B, YANG M-H, BELONGIE S. Robust object tracking with online multiple instance learning[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(8) : 1619–1632.
- [5] SAFFARI A, LEISTNER C, SANTNER J, et al. On-line random forests[C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2009 : 1393–1400.
- [6] HARE S, GOLODETZ S, SAFFARI A, et al. Struck: Structured output tracking with kernels[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2016, 38(10) : 2096–2109.

致谢

本论文是在导师的悉心指导下完成的，从论文的选题到论文的撰写，无不渗透着导师的心血，……值此论文完稿之际，谨对导师的辛勤培育以及谆谆教诲表示最衷心的感谢！

作者简介

1. 基本情况

朱磊，男，陕西西安人，1982年8月出生，西安电子科技大学XX学院XX专业2008级硕士研究生。

2. 教育背景

2001.08～2005.07，西安电子科技大学，本科，专业：电子信息工程

2008.08～，西安电子科技大学，硕士研究生，专业：电磁场与微波技术

3. 攻读硕士学位期间的研究成果

3.1 发表学术论文

- [1] XXX, XXX, XXX. Rapid development technique for drip irrigation emitters[J].RP Journal,UK.,2003,9(2): 104-110.(SCI: 672CZ, EI: 03187452127)
- [2] XXX, XXX, XXX. 基于快速成型制造的滴管快速制造技术研究 [J]. 西安交通大学学报, 2001, 15(9): 935-939. (EI: 02226959521)
- [3] ...

3.2 申请（授权）专利

- [1] XXX, XXX, XXX 等. 专利名称: 国别, 专利号 [P]. 出版日期.
- [2] ...

3.3 参与科研项目及获奖

- [1] XXX 项目, 项目名称, 起止时间, 完成情况, 作者贡献。
- [2] XXX, XXX, XXX 等. 科研项目名称. 陕西省科技进步三等奖, 获奖日期.
- [3] ...

